

文章编号: 1671-6612 (2025) 01-001-09

基于蛇形管相变液冷的 复合热电自发式冷却特性研究

蔡 阳¹ 黄琦霞¹ 黄颖茜¹ 张梓瑄¹ 赵福云²

(1. 暨南大学国际能源学院 珠海 519070; 2. 武汉大学动力与机械学院 武汉 430072)

【摘 要】 针对电子器件热管理中效率低的问题, 提出了基于蛇形管相变液冷强化的热电自发式冷却系统, 通过数值模拟深入研究了系统的参数特性、时空演化特性以及冷却匹配特性。研究结果表明: 系统冷却性能受到蛇形管散热器的几何参数影响, 蛇形管散热器的曲率半径、内径增大, 系统冷却性能提升, 使用水作为工作流体有较好的冷却性能; 系统热电组件的工作性能随着时间变化, 100s 时刻, 系统热电组件产生的电功率达到 0.26W; 系统的冷却特性受到工作流体流速影响较大, 其中系统流速为 $9.63 \times 10^{-17} \text{m/s}$ 对应的热电组件冷热端温度差比 0m/s 流速下的系统热电组件冷热端温度差高 17.32K, 此外, 当蛇形管内流速为 4.18m/s 时, 系统的发电功率和水泵消耗功率相等, 系统实现了功率匹配。研究将为热电自发式冷却技术的应用提供参考意见。

【关键词】 蛇形管散热器; 相变液冷; 复合热电; 冷却特性

中图分类号 TK124 文献标志码 A

Study on Spontaneous Cooling Characteristics of Composite Thermoelectric based on Liquid Cooling of Serpentine Pipe Radiator

Cai Yang¹ Huang Qixia¹ Huang Yingxi¹ Zhang Zixuan¹ Zhao Fuyun²

(1. International Energy College, Jinan University, Zhuhai, 519070;

2. School of Power and Mechanical Engineering, Wuhan University, Wuhan, 430072)

【Abstract】 To address the issue of low efficiency in thermal management of electronic devices, a thermoelectric self-cooling system enhanced by serpentine pipe phase change liquid cooling is proposed. Numerical simulations are conducted to investigate the parametric characteristics, spatiotemporal evolution, and cooling matching properties of the system. The results indicate that the geometric parameters of the serpentine pipe heat sink significantly influence the system's cooling performance. Increasing the curvature radius and inner diameter of the serpentine pipe improves the cooling performance of the system. Water, as the working fluid, demonstrates good cooling performance. The operational performance of the thermoelectric components varies with time, and the electrical power output reaches 0.26 W at 100 seconds. The cooling characteristics of the system are strongly affected by the flow rate of the working fluid. At a flow rate of $9.63 \times 10^{-17} \text{m/s}$, the temperature difference between the hot and cold ends of the thermoelectric components is 17.32 K higher than that at 0m/s . Furthermore, when the flow rate in the serpentine tube reaches 4.18m/s , the generated electrical power equals the power consumed by the pump, achieving power balance. This study will provide references for the application of thermoelectric self-cooling technology.

【Keywords】 Serpentine pipe radiator; Phase change liquid cooling; Composite thermoelectric; Cooling characteristics

基金项目: 广东省基础与应用基础研究基金自然科学基金面上项目 (2023A1515010681); 广东省普通高校重点领域专项项目 (2022ZDZX1005)

作者 (通讯作者) 简介: 蔡 阳 (1989-) 男, 博士研究生, 副教授, E-mail: thomascail301@163.com

收稿日期: 2024-04-19

0 引言

随着电子器件朝着轻量化、小型化发展,对电子器件的工作环境有了更高的要求^[1]。常规电子设备电流产生的热流密度可高达 $100\text{W}/\text{m}^2$ ^[2]。由于集成电子器件在高强度的电流密度下会产生大量的热,影响集成电子器件的使用寿命。因此改善电子器件的工作环境,对集成电子器件进行热管理,有利于延长电子器件的寿命,提高电子器件的工作效率。电子器件热管理有自然对流冷却和强迫对流换热两种方式。自然对流冷却换热效率低,难以满足高度集成化电子器件的冷却需求,强迫对流换热换热效率虽然高,但是会产生额外的电力消耗。基于两种传统电子器件冷却方式, Martínez 等人^[3]利用热电材料的塞贝克效应,提出了热电自发式冷却系统,建立了仿真模型和实验模型,对热电自发式冷却系统进行了研究。

热电自发式冷却是一种利用热电材料的塞贝克效应进行冷却的冷却方式,具有结构简单、清洁环保、噪音小的特点,广泛应用于航天、电子、光伏等领域,能够将热能直接转化为电能,实现余热回收与节能减碳并行^[4]。为了得到更高效的热电自发式冷却系统, Cai 等人^[5]构建了基于能量回收的热电余热回收装置,进行了通风条件下热电余热回收装置的参数和性能优化,得出了热电模块在翅片对流换热下的性能参数; Wang 等人^[6]将主动式通风与热电自发式冷却相结合,对带翅片的热电自发式冷却系统进行了研究,得到了在原有基础上增加 30%发电效率的热电自发式冷却系统; Cai 等人^[7]利用相变材料构建热电自发式冷却系统,对基于 PCM 的热电器件主动冷却性能的动力学特性和参数进行了研究,得到的热电相变主动式冷却系统热电器件发电效率提升了 402.08%。

近年来,除了传统的翅片型与直板型换热器外,蛇形管换热器由于具有换热面积大、灵活性强、反应速度快的优点,常被用于提升各类冷却系统的工作性能。He 等人^[8]利用蛇形管换热器构建了蛇形管式空冷型换热系统,对蛇形管换热器的空冷式回路热虹吸热特性进行了实验研究,得到在空冷条件下蛇形管换热器具有 $266.7\text{W}\cdot\text{cm}^{-2}$ 的热通量传递;黄腾等人^[9]利用 CO_2 作为工质建立了基于二氧化碳的蛇形管空冷换热器,研究了不同几何参数下蛇形管内二氧化碳的流动与换热数值,得到以

1mm 内径为分界蛇形管工质向下流动与向上流动的换热性能。

上述研究表明通过在热电自发式冷却系统中添加换热器能够有效提升热电自发式冷却系统的工作性能,同时在散热器中蛇形管散热器具有较好的换热性能,然而,关于热电自发式冷却系统与蛇形管换热器相结合的相关研究还存在空白,为了填补蛇形热电自发式冷却系统的研究空白,本文针对结合蛇形管散热器的热电自发式冷却技术,提出了一个蛇形相变液冷型热电自发式冷却系统,通过构建基于蛇形管相变液冷强化的热电自发式冷却系统,首先研究了不同蛇形管换热器的几何参数下的系统冷却特性,计算出了蛇形管不同工作流体、内径以及曲率半径下系统的工作性能;其次探究了系统的时空演化特性,得到了系统随着时间变化下的温度特性和功率特性;最后综合讨论了系统的工作特性,研究了不同流速下系统的温度特性和功率特性,进而对系统进行冷却匹配性分析。

1 复合热电自发式冷却系统

1.1 系统结构及原理

蛇形相变液冷型热电自发式冷却系统的模型结构图如图 1 所示。基于蛇形管相变液冷的复合热电自发式冷却系统由蛇形管散热器和热电组件两部分组成。系统的核心部分是热电组件,热电组件由热电臂、铜导片和陶瓷绝缘板组成,热电臂所使用的材料是碲化铋。蛇形管散热器被组装在热电组件的冷端,由相变材料和铜质蛇形管道组成。蛇形冷凝管管内的的工作流体依靠水泵进行驱动产生对流,水泵消耗的功率由热电组件在工作过程中产生,从而实现自发式冷却。图 2 是蛇形管的结构示意图。蛇形相变液冷型热电自发式冷却系统的冷端为蛇形管散热器与自然对流,热端与热源连接。

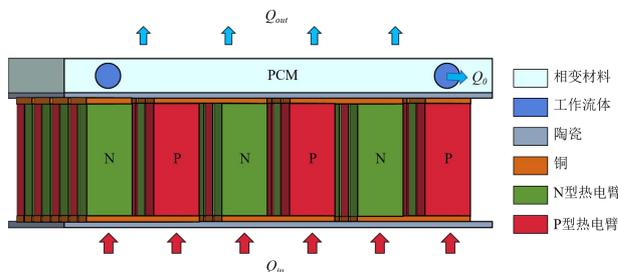


图 1 模型示意图

Fig.1 Schematic diagram of the model

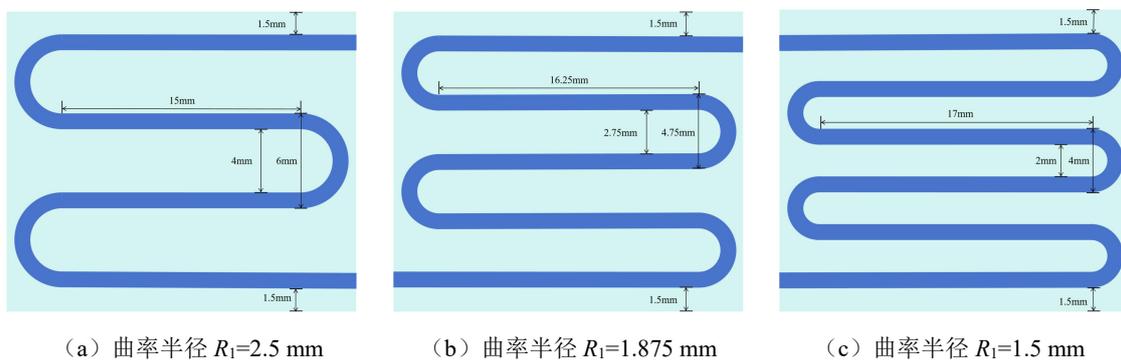


图 2 蛇形管散热器结构示意图 (蛇形管内径为 0.5mm)

Fig.2 Schematic diagram of the structure of the snake-shaped pipe radiator
(The inner diameter of the serpentine tube is 0.5mm)

1.2 多场耦合数值模型

基于蛇形管相变液冷的复合热电自发电式冷却系统的热力学公式如式 (1)、式 (2) 所示。

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} + \rho C_p u \cdot \nabla T + \nabla \cdot q = Q + Q_{ted} \quad (1)$$

$$q = -k \nabla T \quad (2)$$

式中: ρ 是密度, kg/m^3 ; C_p 是恒压热容, $\text{J}/(\text{K} \cdot \text{mol})$; T 是温度, K ; u 是速度, m/s ; q 是传热通量矢量, W/m^2 ; Q 是系统吸收的热量, J ; Q_{ted} 是内部产热, J 。

电学方程如式 (3) 一式 (5) 所示。

$$\nabla \cdot J = Q_{J,v} \quad (3)$$

$$J = \sigma E + \frac{\partial D}{\partial t} + J_e \quad (4)$$

$$E = -\nabla V \quad (5)$$

式中: J 代表电流密度, A/m^2 ; $Q_{J,v}$ 代表馈电线路功率, W ; σ 代表电阻率, $\Omega \cdot \text{m}$; E 代表电场, V/C ; D 代表电位移场, C/m^2 ; J_e 代表电场方向上的电流密度, A/m^2 ; V 表示电位, V 。

流体流动的动力学方程如式 (6)、式 (7) 所示。

$$\rho \frac{\partial u}{\partial t} + \rho (u \cdot \nabla) u = \nabla \cdot [-pI + K] + F \quad (6)$$

$$\rho \nabla \cdot u = 0 \quad (7)$$

式中: p 表示压力, Pa ; I 表示单位矩阵, 1 ; K 表示粘性力, N ; F 表示作用在流体上的外力, N 。

当蛇形管内工作流体为水时, 水泵功率计算公式如式 (8)、式 (9) 所示^[10]。

$$P_{pump} = \dot{V} \Delta P_T \quad (8)$$

$$\dot{V} = \frac{u}{2\pi R_1} \quad (9)$$

式中: \dot{V} 是体积流量, m^3/s ; ΔP_T 是系统中的总压力损失, Pa ; R 是蛇形管的半径, mm ; R_1 是蛇形管的曲率半径, mm 。

当蛇形管内以空气作为工作流体时, 传热系数 h 遵循方程式 (10)^[11]。

$$h = \frac{0.49 \frac{k_a}{L/2}}{\sqrt{\text{Re}_{D_h} \text{Pr}_{D_h}}} D_h \quad (10)$$

式中: α 表示塞贝克系数, V/K ; h 为传热系数, $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$; 温差发电器内部总电阻值为 r , Ω ; 外部负载电阻值为 R_L , Ω ; N 为热电偶对数, 个; T_h 、 T_c 分别表示热电组件的热侧和冷侧温度, K 。

式 (11)、式 (12) 解释了温差发电器电路中产生电流的原理^[12]。

$$E = N \cdot \alpha (T_h - T_c) \quad (11)$$

$$I = \frac{E}{R_L + r} = \frac{N \cdot \alpha (T_h - T_c)}{R_L + r} \quad (12)$$

热电发电功率计算公式遵循经典物理学, 如式 (13)、式 (14) 所示。

$$P_{TE} = UI \quad (13)$$

$$P_m = P_{TE} - P_{pump} \quad (14)$$

式中: U 表示热电偶两端电势差, V ; I 表示热电偶中产生的平均电流, A ; P_{TE} 表示热电功率,

W ; P_{pump} 表示水泵消耗的功率, W ; P_m 表示发电功率与消耗功率之间的差值, W 。

2 复合热电自发式冷却性能分析

2.1 模型求解及验证

2.1.1 模型设置及假设

在计算过程中,系统所使用的相变材料参数见表 1。忽略蛇形管内的液体的流动时重力因素带来的影响,数值模拟过程中忽略相变材料的融化和凝固过程,只考虑与系统热电组件热端相连接的设备作为热源,热源的热耗率为 8.36W,蛇形管散热器一端与热电组件冷端相连,另一端与自然对流接触,与自然对流相接触端面的热耗率为 $5W/(m^2 \cdot K)$,系统表面绝缘且不考虑表面热辐射。忽略蛇形管管壁厚度的影响。表 2 给出了系统的几何尺寸。

表 1 相变材料参数^[13]

	导热系数 W/(m·K)	恒压热容 J/(kg·K)	密度 kg/m ³	相变 温度
相变材料固 态	0.25	3200	915	32°C
相变材料液 态	0.125	2800	880	

表 2 蛇形相变液冷的复合热电自发式冷却系统几何尺寸

物性	值
相变材料尺寸	19.0mm×22.0mm
相变材料厚度	1.5mm
热电臂尺寸	2.0mm×2.0mm
热电臂高度	5.0mm
铜导片尺寸	5.0mm×2.0mm
铜导片厚度	0.25mm
陶瓷绝缘板尺寸	19.0mm×22.0mm
陶瓷绝缘板厚度	0.25mm

2.1.2 网格独立性验证

本研究建立了多物理场仿真模型,采用网格数为 80745、124601、211877、364827、703140 的网格对模型进行网格独立性验证。表 3 为网格独立性验

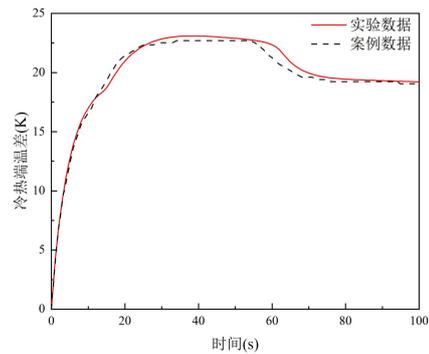
证结果。结果显示,系统相变过程的极差仅为 0.03K,认为网格对模型计算过程的影响较小。本研究选用的网格数为 80745。

表 3 网格独立性验证

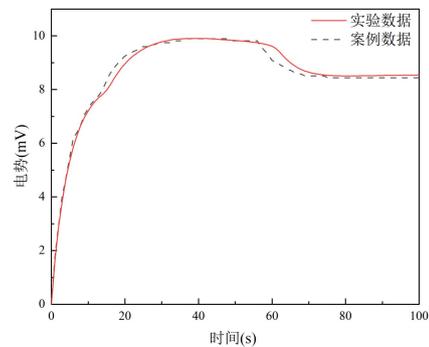
网格 编号	网格数/ 个	最小单元 格/mm	最大单元 格/mm	相变材料相 变温度/K
I	80745	0.880	4.18	300.20
II	124601	0.616	3.30	300.18
III	211877	0.396	2.20	300.17
IV	364827	0.220	1.76	300.17
V	703140	0.088	1.21	300.17

2.1.3 模型验证

本研究通过建立仿真模型与 Manikandan^[13]的实验数据进行对比,验证本次实验的科学性,图 3 显示的是验证结果。结果表明实验数据与仿真结果相比最大误差为 6.16%,最小误差仅为 0.03%,因此本研究所搭建的仿真模型能够较好地反映系统的工作状态,仿真得到的数据结果具有较强的参考性。



(a) 温度特性验证



(b) 电压数据验证

图 3 模型验证

Fig.3 Model validation

2.2 参数特性分析

2.2.1 不同曲率半径 R_1 冷却特性分析

蛇形管的曲率半径影响蛇形管的换热效率, 通过改变蛇形管的曲率半径, 可以得到曲率半径对系统冷却性能的影响。图 4 展示了以水做为工作流体且流速为 4.18m/s、蛇形管内径为 0.5mm 时, 不同曲率半径下基于蛇形管相变液冷的复合热电自发电式冷却系统热电组件的冷热端温度。在 100s 时刻, 曲率半径为 1.5mm 的蛇形管热端温度为 485.56K, 冷端温度为 381.18K; 曲率半径为 2.5mm 的蛇形管热端温度为 497.77K, 冷端温度为 396.45K。使用曲率半径为 1.5mm 的蛇形管散热器较使用曲率半径为 2.5mm 的蛇形管散热器的系统热端、冷端温度分别降低了 13.21K、15.27K。这是由于曲率半径的增大导致单位体积相变材料与蛇形管的接触面积变小, 换热面积变小, 换热量减少, 冷热端温度均升高。同时伴随曲率半径的增大, 蛇形管内流体的功能损耗降低, 湍流成分减少, 蛇形管内流体的工作状态会变得更稳定。

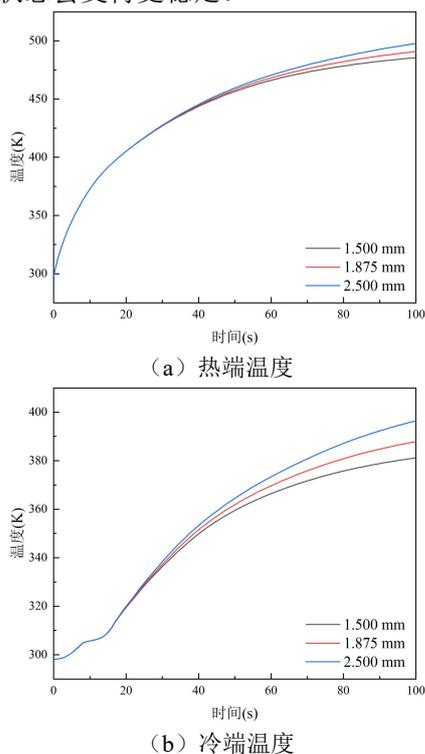


图 4 蛇形管不同曲率半径系统冷却特性

Fig.4 System cooling characteristics of different radii of curvature of serpentine tubes

因此随着曲率半径的增大, 系统的热端温度增高, 冷端温度也增高, 整体温度呈现上升的趋势,

冷却性能下降。

2.2.2 不同管道内径 R 冷却特性分析

蛇形冷凝管内的体积流量受到蛇形管的管径大小控制, 通过改变蛇形冷凝管的管径, 可以改变蛇形冷凝管的体积流量, 得到不同管径下的冷却特性。图 5 显示的是以 2.5mm 作为曲率半径, 改变蛇形管内径大小, 不同蛇形管内径对系统冷却特性的影响。在 100s 时刻, 系统蛇形管内径以 0.05mm 为增量逐次增加对应热端温度分别降低 3.58K、1.92K、2.77K、-6.59K, 冷端温度分别降低 5.02K、2.59K、3.72K、-8.87K。这是由于蛇形管内径的改变影响了系统的单位体积流量大小, 蛇形管的内径越大, 单位体积流量越大, 蛇形管与外界环境进行热交换的接触面积也越大, 进而增长了系统与流体之间的换热速率, 使得系统的温度降低, 系统的冷却性能得到提升。同时随着蛇形管的体积增大, 相变材料的体积减小, 削弱了相变材料的工作效果, 因此当蛇形管的内径增加至 0.6mm 时, 系统的冷热端温度上升。

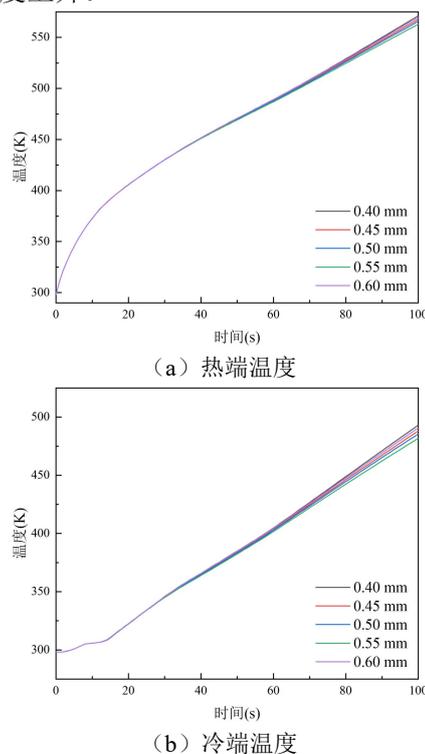


图 5 不同蛇形管内径系统冷却特性

Fig.5 System cooling characteristics of different snake pipe inner diameter

研究结果表明, 随着蛇形管内径的增大, 系统热电组件的冷热端温度均不断降低。当蛇形管内径

增大到一定值后,系统相变材料的作用效果受到影响,系统热电组件的冷热端温度上升。

2.2.3 不同流体冷却特性分析

蛇形管工作时的换热效率受蛇形管内工作流体的影响。根据不同流体条件下的系统工作情况建立仿真实验,分别研究了真空、空气、水三种条件下基于蛇形管相变液冷的复合热电自发电式冷却系统的冷却特性,得到结果如图 6 所示。在 100s 时刻,使用空气作为工作流体的热端温度比以水作为空气流体条件下的热端温度高 14.8K,冷端温度高 17.58K,冷却效果较差;真空条件下的热端温度比以水作为空气流体条件下的热端温度高 3.49K,冷端温度高 4.40K。水的比热容较大,物理性质稳定,冷却性能较好,相较于空气而言具有更好的冷却性能,空气对流换热能够带走系统中的部分热量,因此空气作为工作流体条件下的系统冷却特性由于真空条件下的系统冷却特性。

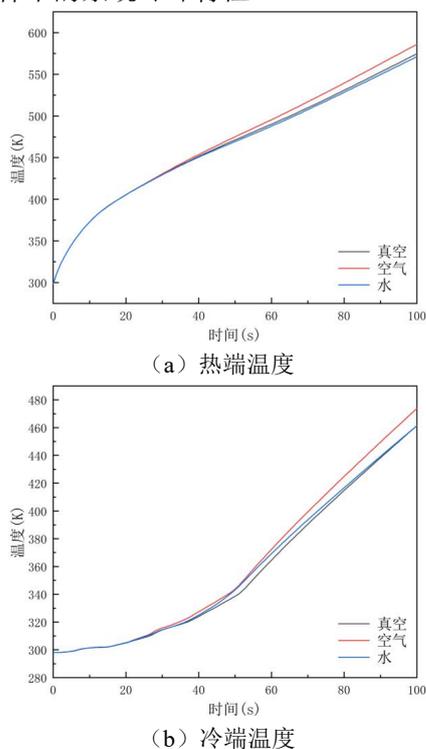


图 6 不同工作流体系统冷却特性

Fig.6 Different cooling characteristics of the working fluid systems

结果显示,水的和真空条件下,系统的热端温度与冷端温度较为接近。水和真空条件下系统的冷热端温度低于空气条件下系统的冷热端温度,因此水和真空条件下的系统冷却性能较好,而空气条件

下的系统冷却性能较差。根据实验结果,本研究选用水作为蛇形管散热器的工作流体。

2.3 冷却时空演化特性分析

本节对冷却系统的时空演化特性进行了研究,通过搭建蛇形管相变液冷的复合热电自发电式冷却系统,计算了 100s 内系统的温度和功率时空演化特性,综合分析系统的工作特征。

图 7 (a) 展示的是系统冷热端温度与温差特性。从结果可以看出,在 0~16s 内,系统热电组件的冷热端温度不断增加,温差也随之增加。在 16s 时刻,热电组件冷热端温度差达到 83.22K,16s 以后,系统的冷热端温度增加,但增加速度减慢,系统的温度差趋于稳定。图 7 (b) 展示的是系统功率特性曲线,从结果中可以看出,系统的电势和功率在 0~16s 时间段内持续增长,16s 时刻,热电模块产生的电势和电功率分别达到 0.53V 与 0.18W,此后电势与电功率的增长速度减慢,在 100s 时刻,系统热电组件的发电功率为 0.26W。由于热电组件的发电功率受到热电组件冷热端温度差的显著影响,当热电组件冷热端温度上升,热电组件的发电功率也会随之增加。

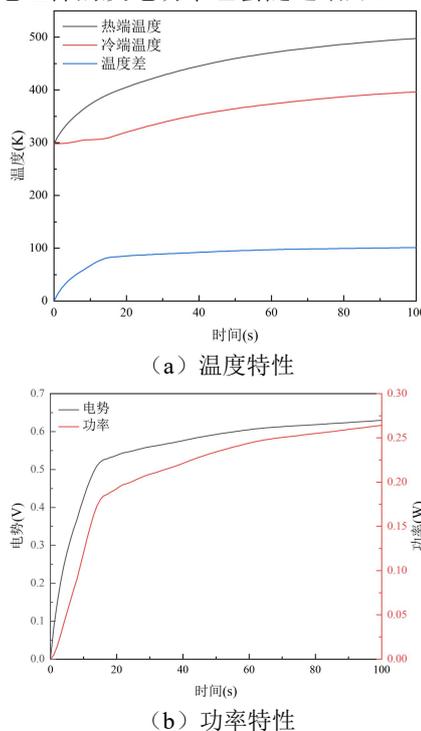


图 7 不同流体流速下系统时空特性(入口流速 $u=4.18\text{m/s}$, 蛇形管曲率半径 $R_1=2.5\text{mm}$)

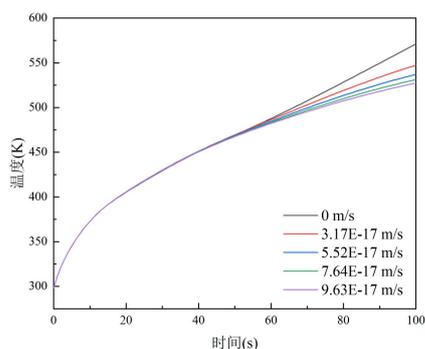
Fig.7 Spatiotime characteristics of the system at different fluid flow rates(The inlet flow rate $u = 4.18\text{m/s}$ and the radius of curvature of the serpentine tube $R_1=2.5\text{mm}$)

因此, 热电组件的冷热端温度差增大, 热电组件产生的电势也会增大, 热电组件产生的电功率也随之增加, 热电组件的冷热端温度差趋于稳定; 热电组件产生的电势也会趋于稳定, 热电组件产生的电功率也随之趋于稳定。

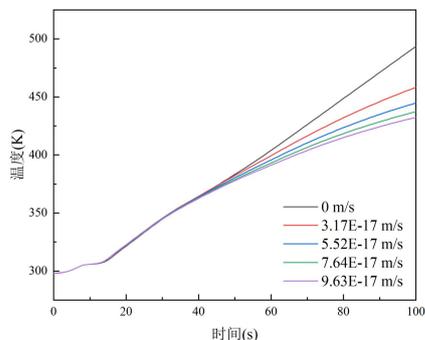
2.4 冷却匹配特性分析

2.4.1 温度特征

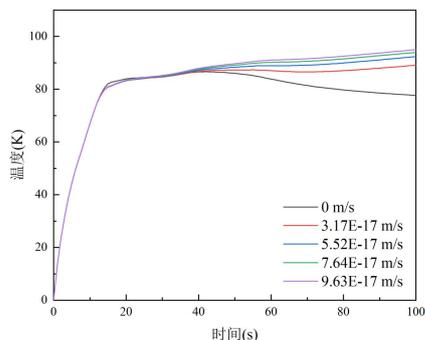
冷却系统的温度特征与系统的冷却性能存在着紧密关系。本节对系统的热电组件冷热端温度和温度差、相变材料的温度进行了分析, 得到了系统工作的温度特性。



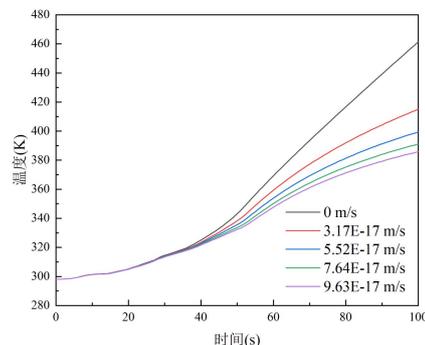
(a) 热电组件热端温度



(b) 热电组件冷端温度



(c) 热电组件冷热端温度差



(d) 相变材料温度

图 8 不同流体流速下系统温度特性

Fig.8 System temperature characteristics at different fluid flow rates

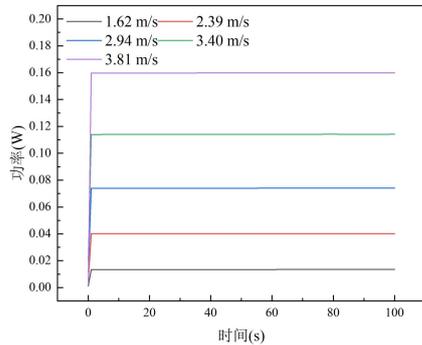
系统的冷却特性如图 8 所示。在其他条件不发生变化的情况下, 系统的冷热端温度随着蛇形管内流体流速的增加而下降, 在同一时刻下, 系统热电组件冷热端温度差越大, 对应的流速下的系统相变材料温度越高。100s 时刻, 系统流速为 $9.63E-17\text{m/s}$ 下对应的热电组件冷热端温度差较 0m/s 流速下的系统热电组件冷热端温度差高 17.32K , 相变材料温度低 75.64K 。由于系统的蛇形管内流速增加加快了系统散热的速度, 使得系统整体温度下降, 系统冷端的温度受流体流速的影响较大, 导致在蛇形管内工作流体流速较高的情况下系统热电组件的冷热端温度差大。因此增加系统的工作流体流速能够有效提高系统热电组件的冷热端温度差, 增强热电组件的工作性能, 为蛇形管散热器入口处水泵提供更大的功率, 提升系统冷却性能。

2.4.2 流速特征

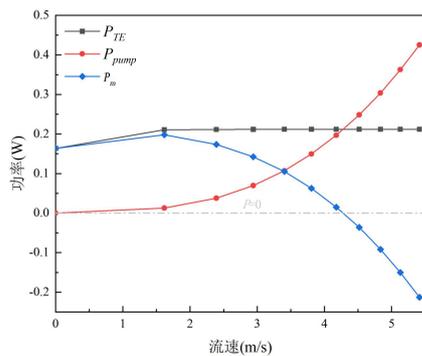
由于蛇形管内流体流速与系统热电组件的功率存在一定的关系, 因此随着水泵消耗功率的增加, 热电组件产生的电功率也会随之增加, 深入探究系统热电组件的功率与水泵消耗功率之间的匹配性关系具有现实意义。

图 9 是同一个系统在不同蛇形管流体流速下所消耗的水泵功率以及系统的流速特征。从图中可以看出, 当蛇形管内流体流速低于 4.18m/s 时, 水泵所消耗的水泵功率低于热电组件所提供的电功率; 当蛇形管内流体流速达到 4.18m/s 时, 系统热电组件提供的电功率与水泵消耗的热功率相等; 当蛇形管内流体流速大于 4.18m/s 后, 水泵消耗的功

率大于系统热电组件所能提供的电功率。这是因为随着蛇形管内流体流速的增加,水泵消耗的功率也随之增加,热电组件产生的功率受到工作流体流速的影响较小。从结果可知,当水泵消耗的功率大于系统热电组件所产生的功率时,系统需要附加电源来进行额外供电。



(a) 不同流速系统消耗水泵功率



(b) 不同流速系统功率

图9 系统功率特性

Fig.9 System power characteristics

3 结论

本文根据热电自发式冷却系统,提出了一种新型的蛇形相变液冷型热电自发式冷却系统,并通过系统的参数特性、时空演化特性以及冷却匹配特性进行分析,综合评估得到蛇形相变液冷型热电自发式冷却系统的冷却特性,进而得出如下结论:

(1) 蛇形管散热器中的蛇形管曲率半径越大,蛇形管的散热效率越低,蛇形管内流体的工作状态越稳定,湍流成分减少;蛇形管内径增大,系统的冷却性能变好,所占用的空间越大,相变材料的作用越弱;蛇形管内工作流体为水时系统冷却性能较好,冷热端温度有明显的下降。

(2) 系统工作开始时,热电组件的冷热端温度不断上升,0~16s时间段内,系统冷热端温度差增长了83.22K,16s以后热电组件冷热端的温度仍然不断上升且不断趋于稳定,系统热电组件产生的功率随着温度的升高而增加,0~100s时间段内,系统热电组件产生的电功率增长了0.26W。

(3) 系统热电组件的冷热端温度随着蛇形管内工作流体流速的增加而下降,冷热端温度差随着工作流体流速的增加而增加,最大增量为17.32K,相变材料的温度随着工作流体流速的增加而下降,对应最大温度差增量的最大相变材料温度减量为75.64K。当蛇形管内流速为4.18m/s时,水泵消耗的功率与系统热电组件产生的功率相等,系统实现功率匹配。

基于蛇形管相变液冷的复合热电自发式冷却系统将主动式冷却与被动式冷却相结合,利用热电组件产生的电能来供给水泵工作,流体流动带走系统中的热量,达到增强系统冷却性能的效果。本文设计可以为复合型热电自发式冷却系统的实际应用提供参考,为冷却系统的研究提供新思路。

参考文献:

- [1] Cai Y, Liu D, Zhao F Y, et al. Performance analysis and assessment of thermoelectric micro cooler for electronic devices [J]. Energy Conversion and Management, 2016, 124:203-11.
- [2] G Naveen, Patil, Tapano Kumar Hotta. A review on cooling of discrete heated modules using liquid jet impingement[J]. Frontiers in Heat and Mass Transfer, 2018,11:16.
- [3] A Martínez, D Astrain, A Rodríguez. Experimental and analytical study on thermoelectric self cooling of devices[J]. Energy, 2011,36(8):5250-5260.
- [4] Cai Y, Wang L, Wang W W, et al. Solar energy harvesting potential of a concentrated photovoltaic-thermoelectric hybrid system: Bidirectional modeling and performance optimization [J]. Journal of Cleaner Production, 2020,254:120150.
- [5] Cai Y, Wang W W, Ding W T, et al. Entropy generation minimization of thermoelectric systems applied for

- electronic cooling: Parametric investigations and operation optimization[J]. *Energy Conversion Management*, 2019,186:401-414.
- [6] Wang X J, Deng W, Tang X, et al. Experiment and simulation study on the specification parameters of finned heat sink for thermoelectric system in consideration of radiation among fins. *International Journal of Thermal Sciences*, 2023,185:108097.
- [7] Cai Y, Hong B H, Wu W X, et al. Active cooling performance of a PCM-based thermoelectric device: Dynamic characteristics and parametric investigations[J]. *Energy*, 2022,254:124356.
- [8] He Y CH, Hu CH ZH, Li H Y, et al. Experimental investigation on air-cooling type loop thermosyphon thermal characteristic with serpentine tube heat exchanger[J]. *International Journal of Refrigeration*, 2022,138:52-60.
- [9] 黄腾,李雪芳,柯道友,等.不同几何参数竖直蛇形管内超临界压力 CO₂ 流动与换热数值模拟[J].*清华大学学报*,2020,60(3):263-270.
- [10] Robel Kiflemariam, Lin CH X. Numerical simulation of integrated liquid cooling and thermoelectric generation for self-cooling of electronic devices[J]. *International Journal of Thermal Sciences*, 2015,94:193-203.
- [11] Z Duan, YS Muzychka. Experimental Investigation of Heat Transfer in Impingement Air Cooled Plate Fin Heat Sinks[J]. *Transactions of the ASME*,2006,128:412-418.
- [12] 贺蓉蓉.热电自冷却系统的热通路设计与实验研究[D].湖北:武汉大学,2018.
- [13] S Manikandan, C Selvam, Nikunj Poddar, et al. Thermal management of low concentrated photovoltaic module with phase change material[J]. *Clean. Prod.*, 2019,219: 359-367.